

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра информатики и программирования

НАЗВАНИЕ
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 273 группы
направления 02.04.03 Математическое обеспечение и администрирование
информационных систем
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Ворониной Екатерины Юрьевны

Научный руководитель:

доцент кафедры ИиПЮ _____ Е. В. Кудрина

Зав. кафедрой:

к. ф.-м. н., доцент _____ М.В. Огнева

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Развитие беспилотной авиации (БА) входит в область интересов государственной промышленной политики. В связи с утверждением Правительством РФ стратегии развития беспилотной авиации до 2030 года и на перспективу до 2035 года [1], в настоящее время сфера беспилотной авиации получает значительную финансовую поддержку со стороны государства.

Нарастающий интерес к БА — общемировая тенденция. Это происходит по ряду причин. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), как правило, значительно дешевле пилотируемых самолетов и вертолетов. Обучение оператора обходится дешевле, чем подготовка пилота. Отсутствие человека на борту исключает необходимость в системах жизнеобеспечения, снижает массу и габариты аппарата, а также позволяет увеличивать диапазон допустимых перегрузок. Кроме того, потери беспилотников не сопряжены с человеческими жертвами, что повышает общий уровень безопасности при эксплуатации.

БПЛА можно разделить на два типа: управляемые оператором и автономные, где функции пилотирования полностью возложены на систему управления. Человеческий мозг эффективно обрабатывает визуальные и другие сенсорные данные, позволяя распознавать объекты и ситуации. Однако по причине ограниченной скорости реакции, внимания и памяти человек не всегда обеспечивает надежное управление.

За последние годы автономные БПЛА значительно повысили свою надежность и выполняют все более широкий спектр задач в различных отраслях. Однако они все еще не используют весь свой физический потенциал. Большинство таких аппаратов летает с малой скоростью, близкой

к зависанию, чтобы обеспечить стабильную работу алгоритмов восприятия и избегания препятствий [2, 3].

Совершенствование автономных систем управления в аспектах скорости и маневренности позволяет расширить возможности БПЛА: увеличить дальность и скорость полета, повысить способность избегать быстро движущиеся объекты, а также обеспечивать управление в сложных, ограниченных пространствах. Несмотря на прогресс, по универсальности и надежности автономные БПЛА все еще уступают человеку, что требует проведения дальнейших исследований для сокращения этого разрыва.

Роторно-винтовые БПЛА (квадрокоптеры) являются одними из самых динамичных платформ в беспилотной авиации. Благодаря своей маневренности они применяются в самых разнообразных сценариях: от полетов в густых лесах и городской застройке до мониторинга пожароопасных зон, инспекции инфраструктуры, логистики и сельского хозяйства [2, 3].

Одним из наиболее сложных и показательных маневров для таких систем является акробатический флип — вращение на 360° по одной из осей. Такой маневр востребован не только в демонстрационных полетах, но и в прикладных задачах — например, при резком уклонении от препятствий, смене траектории в условиях ограниченного пространства, при калибровке систем навигации (например, при инверсии ориентации антенны или датчика), а также при контролируемом выходе из срыва устойчивости, вызванного внешними возмущениями или агрессивными маневрами. Успешное выполнение флипа требует четкого управления угловыми скоростями и тягой с учетом текущего состояния дрона и его динамических ограничений.

В то время как популярные открытые решения, такие как платформа Clover [4], реализуют флип с использованием жестко заданной последовательности команд — например, путем задания фиксированной угловой скорости на ограниченное время — такие подходы фактически игнорируют динамику системы и не используют обратную связь. Они не адаптируются к различным аппаратным конфигурациям, что снижает точность и надежность выполнения маневра.

Целью данной работы является разработка системы управления траекторией движения квадрокоптера, в котором флип рассматривается как контролируемое движение с учетом полной динамической модели квадрокоптера. Поставленная цель определила следующие задачи:

Рассмотреть историю развития БПЛА.

- Описать архитектуру бортового аппаратного устройства и системы управления БПЛА.
- Представить математическую модель роторно-винтового БПЛА
- Изучить алгоритмические основы управления движением БПЛА.;
- Представить обзор инструментальных средств, применяемых для разработки систем управления траекторией движения БПЛА
- Научиться получать и обрабатывать данные сенсоров квадрокоптера.
- Разработать динамическую модель квадрокоптера, а также реализовать на ее основе контроллер выполнения флипа.
- Провести верификацию контроллера в симуляционной среде.

Методологические основы автоматизация траекторного управления БПЛА в условиях ограниченной навигационной информации представлены в работах Терентьева В.М, Локерсио А., Голубкова А.В, Y. Pan, Q. Lin, H. Shah,

JM Dolan, Kulathunga G., Девитт Д.В., Федоренко Р.В., Климчука А.С., Фетисова В.С. , Неугодниковой Л.М.

Практическая значимость магистерской работы заключается в демонстрация применимости оптимизационного управления в задачах управления БПЛА с мягкими ограничениями по реальному времени.

Структура и объём работы. Магистерская работа состоит из введения, двух разделов, заключения, списка использованных источников и семи приложений. Общий объем работы – 103 страниц, из них 53 страниц – основное содержание, включая 17 рисунков, список использованных источников информации – 43 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Теоретическая часть» посвящен теоретическим аспектам, охватывает ключевые положения, необходимые для понимания принципов разработки систем управления траекторией движения беспилотных летательных аппаратов. Вначале рассматривается история развития БПЛА, затем описывается архитектура бортового аппаратного комплекса, включая сенсорные модули, исполнительные механизмы и вычислительные блоки, обеспечивающие функционирование системы управления.

Особое внимание уделяется математическому моделированию роторно-винтового БПЛА: рассматриваются кинематические и динамические уравнения, описывающие поведение аппарата в пространстве. Изучаются алгоритмические основы управления движением, включая подходы к стабилизации, навигации и формированию траекторий. Также представлен обзор современных программных и аппаратных средств, применяемых при

проектировании и реализации систем управления БПЛА, включая симуляционные среды и платформы разработки систем управления.

Второй раздел «Практическая часть» посвящен реализации системы управления траекторией движения квадрокоптера. В рамках этой части выполнена интеграция сенсорных данных с бортовой системой, обеспечена предварительная обработка информации от инерциальных и других датчиков. На основе теоретических моделей создана динамическая модель квадрокоптера, использованная для тестирования и отладки алгоритмов управления.

Одним из центральных результатов является реализация контроллера, обеспечивающего выполнение флипа. Контроллер был протестирован в симуляционной среде, что позволило провести верификацию его устойчивости и адекватности. В процессе работы студентом были разработаны и реализованы оригинальные алгоритмы управления, создан программный модуль, предложен методический подход к проектированию управляющих систем для БПЛА.

Раздел завершается выводами, в которых отмечается успешность реализации поставленных задач. Разработанная система показала высокую точность и устойчивость при выполнении манёвра в условиях моделирования, что подтверждает корректность выбранной методики и потенциал её применения в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом все поставленные задачи были выполнены. И поставленная цель была достигнута. Ключевой вклад заключается в разработке адаптивной системы управления на основе динамической модели квадрокоптера с использованием оптимизатора iLQR. Для проведения тестирования была создана специализированная симуляционная среда на базе Gazebo, позволяющая верифицировать алгоритмы в условиях, приближенных к реальным.

Реализованная система управления структурирована и модульна: алгоритмы разбиты на фазы и снабжены полной отрицательной обратной связью, что позволяет оформить их как библиотечные модули и интегрировать в другие ROS/ROS 2-системы.

Сравнительный анализ показал заметные преимущества предложенного подхода по сравнению с примитивным управлением. Как демонстрируют результаты моделирования, система на базе iLQR позволяет существенно снизить просадку по высоте и обеспечить более устойчивое и предсказуемое поведение дрона при выполнении сложных маневров, таких как флип. Снижение по оси OZ при использовании модели оказалось более чем в два раза меньше по сравнению с простым решением. При этом отклонения по осям XY (около 0.27 м) сопоставимы с размерами дрона и считаются допустимыми, а восстановление после флипа произошло за 0.5 секунды.

Несмотря на наличие научных публикаций, в которых рассматривается применение iLQR для управления квадрокоптерами, на данный момент не существует открытых проектов, реализующих такой подход на стеке ROS2, PX4. Таким образом, разработка представляет собой уникальный пример интеграции современных средств робототехники с оптимизационным

управлением в мягком реальном времени, что делает проект актуальным и практически значимым.

Основные источники информации:

- Терентьев, В.М. Развитие теоретических основ и новые методологические подходы для разработки системы траекторного управления перспективными беспилотными летательными аппаратами / В.М. Терентьев. - М. : Инновационное машиностроение, 2023.
- Локерсио А. и др. Обучение высокоскоростному полету в дикой природе // Science Robotics. - 2021.- Т. 6, № eabg5810. - DOI: 10.1126/scirobotics.abg5810.
- Голубков А.В. Моделирование движения объекта по сложной траектории с обнаружением изменения и идентификацией режимов движения : дис. канд. физико-математических наук : 05.13.18 : защищена 30.05.2022
- Зеленский В.А., Ковалев М.А., Овакимян Д.Н., Кириллов В.С. Математическая модель обобщенной кинематической схемы квадрокоптера и ее программная реализация // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, No 1. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-7-20
- Y. Pan, Q. Lin, H. Shah и JM Dolan, «Безопасное планирование для самостоятельного вождения с помощью адаптивного ограниченного ILQR», Международная конференция IEEE/RSJ по интеллектуальным роботам и системам (IROS) 2020 г. , Лас-Вегас, Невада, США, 2020 г., стр. 2377–2383, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340886.

- Kulathunga G., Devitt D., Fedorenko R., Klimchik A. S., Path Planning Followed by Kinodynamic Smoothing for Multirotor Aerial Vehicles (MAVs), *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2021, Vol. 17, no. 4.
- Hiba, A.; Gáti, A.; Manecy, A. Optical Navigation Sensor for Runway Relative Positioning of Aircraft during Final Approach. *Sensors* 2021, 21, 2203. DOI:/10.3390/s21062203